

뿔칠 방수 멤브레인이 시공된 터널 라이닝의 수분이동에 관한 수치해석 연구

이철호, 최순욱, 강태호, 장수호*

A Numerical study on the Moisture Transport of Concrete Tunnel Linings with the Sprayable Waterproofing Membrane

Chulho Lee, Soon-Wook Choi, Tae-Ho Kang, Soo-Ho Chang*

Abstract The sprayable waterproofing membrane is installed between shotcrete to provide crack bridging and hence prevent flow of liquid water as a waterproofing system. Because of its material characteristics, the sprayable membrane can be constructed at more complex structure than sheet membrane. The main component of the sprayable waterproofing membrane is a polymer-based material, therefore, moisture can migrate through sprayable waterproofing membrane materials by capillary and vapor diffusion mechanisms. The moisture transport mechanisms can have an influence on the degree of saturation and may influence the pore pressure and risk of freeze-thaw damage on concrete linings and membrane. In this study, long-term hygrothermal behavior was simulated with considering moisture transport and long-term effects on saturation of tunnel linings. From the simulation, due to water absorption and vapor transport properties of sprayable membrane, change of relative humidity and water content in tunnel lining can be evaluated.

Key words Sprayable waterproofing membrane, Tunnel, Waterproof, Moisture transport, Numerical analysis

초 록 뿔칠 방수 멤브레인은 슛크리트 사이에 시공되어 라이닝 크랙을 통한 누수를 방지하는 목적으로 최근 유럽 국가를 중심으로 시공 사례가 늘어가고 있다. 뿔칠 방수 멤브레인은 방수 시트에 비해 복잡한 단면에도 시공이 용이하기 때문에 이용 사례가 늘어갈 것으로 전망된다. 뿔칠 방수 멤브레인은 폴리머로 구성된 재료로서 투수성이 매우 낮지만 수분의 이동에 의해 포화가 되고 이로 인해 콘크리트 재료에 간극수압이나 동결 문제를 일으킬 수 있는 우려가 있다. 본 연구에서는 뿔칠 방수 멤브레인의 수분이동과 계절변화를 고려하여 슛크리트 라이닝의 열-습도 전달 장기 해석을 수행하였다. 해석을 통해 뿔칠 방수 멤브레인의 수분 흡수 작용과 수분 이동으로 인한 상대습도 변화를 고찰할 수 있었으며 이로 인한 장기적 변화를 묘사할 수 있었다.

핵심어 뿔칠 방수 멤브레인, 터널, 방수, 수분이동, 수치해석

1. 서 론

뿔칠형 방수 멤브레인(sprayable waterproofing mem-

brane)은 폴리머로 구성된 방수 목적의 재료로 시공이 간편하고 인력동원이 기존 방수 공법에 비해 적으며 타설 두께가 3 mm 내외로 크지 않다는 장점을 가지고 있다. 최근 1차 슛크리트 이후 뿔칠형 방수 멤브레인을 시공하고 2차 슛크리트를 시공하는 복합 방수 구조가 터널 내 방수 목적으로 연구가 진행되고 있다(Gomes, 2005; ITA/AITES, 2013; Maidl, 2013; Lemke, 2014; Holter, 2015). 특히, 국제터널협회(ITA)에서는 뿔칠형 방수 멤브레인에 관한 설계 가이드라인을 제시하고 있어서(ITA/AITES, 2013) 유럽에서는 사용 실적이 늘고 있는 실정이다. 뿔칠형 방수 멤브레인은 터널 벽

Received: Jun. 17, 2016

Revised: Jun. 24, 2016

Accepted: Jun. 24, 2016

*Corresponding Author: Soo-Ho Chang

Tel) +82319100661, Fax) +82319100561

E-Mail) sooho@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do,
10223, Rep. of Korea

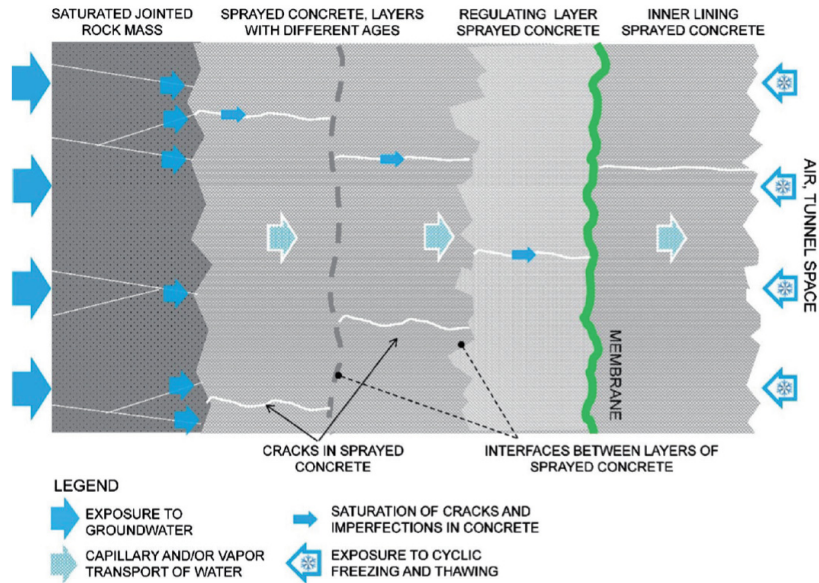


Fig. 1. Conceptual drawing of the sprayed concrete lining structure with constituent materials and water exposure (Holter, 2015)

면에 연속적으로 시공되며 표면의 강한 부착력을 발휘하는 재료로서 슛크리트와 구조적으로 잘 결합된 복합 구조를 이룬다. 특히 습식으로 시공되기 때문에 상이한 재료 사이에서 완전한 접착을 이룬다고 가정하는 것이 일반적이다(Holter, 2016). 뿔칠 방수 멤브레인은 이러한 재료적 특성으로 인해 기반암과 라이닝에 크랙이 발생하여 물이 이동되더라도 강한 부착력과 연속적인 타설면으로 인해 터널 내부로 물의 이동을 차단하는 역할을 하게 된다. 하지만 뿔칠 방수 멤브레인은 지하수가 어느 정도 예상되는 지역에서 고려가 되고 터널 라이닝 내부에 방수 멤브레인 외에 다른 재료들은 시공하지 않기 때문에 지반으로부터 터널 라이닝 구조 방향으로 모세관에 의한 증기 포화가 가능하고 터널 내부 공기 중으로 수분의 이동도 예상된다. 이러한 흐름은 Fig. 1과 같이 슛크리트 내부의 크랙과 모세관이나 증기 이동, 온도 변화 등으로 복잡하게 발생한다(Holter, 2015).

뿔칠 방수 멤브레인에 사용되는 EVA(Ethyl-Vinyl-Acetate) 계통의 재료는 물에 직접적으로 노출이 되었을 때 물을 흡수하고 건조한 공기에 노출될 때 수분을 증발시키는 것으로 알려져 있다(Holter, 2015). 이러한 현상은 시공된 방수 멤브레인의 수분 변화를 야기하고 멤브레인의 접착 인장 강도나 재료적 변형과 같은 물리적 성질을 변화시키는 원인이 될 수 있다(Holter and Geving, 2016). Holter and Geving(2016)은 뿔칠형 방수 멤브레인이

시공된 터널에서 채취한 시료를 사용하여 자연 압반 경계면에 위치한 라이닝은 100% 모세관 포화도(DCS, degree of capillary saturation)를 보였으며 라이닝 표면으로 갈수록 감소한다고 보고하였다. 즉, 뿔칠형 방수 멤브레인이 시공된 상태라고 하더라도 앞서 언급한 수분의 이동으로 인해 지반으로부터 터널 내부에 노출된 라이닝 표면까지 수분 이동과 모세관 흡수 현상으로 수분이 라이닝 내부에서 이동한 것을 실험적으로 보고하였다. 또한, 동결 실험과 크랙 브리징 실험을 통해 방수 멤브레인 내부의 수분의 영향으로 영하 3도에서 1 mm 크랙이 발생할 가능성을 언급한 바 있어서 겨울철 영하의 온도를 유지하는 국내의 조건에서도 이를 충분히 고려해야 할 것으로 판단된다.

이러한 연구는 유럽을 중심으로 최근에 활발히 수행되는 것으로 아직까지 국내에서는 이와 관련된 시공 실적이나 실험적 연구가 진행되고 있지 않고 있어 터널 내부의 수분 변화를 사전에 이해하여 뿔칠 방수 멤브레인의 설계에 적용할 수 있는 연구가 필요한 시점으로 판단된다. 폴리머를 기반으로 하는 뿔칠 방수 멤브레인은 터널 구조에서 수행되는 구조 해석과는 별개로 수분 이동이 검토되어야 하는 어려움이 있으나 사용되는 재료가 일반적으로 사용되는 구조재료가 아니고 수분 포화 상태에 따라 장기 물성을 고려해야 하기 때문에 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구는 방수

멤브레인이 시공된 복합 구조에서 발생할 수 있는 수분 이동과 모세관 흡수로 인해 변화하는 터널 라이닝의 수분 변화를 수치해석 방법으로 검토하였으며 연구에서 고려한 해석 방법은 터널 라이닝에서 수분에 의해 발생할 수 있는 동결 문제나 간극 수압 문제를 검토하기 위한 기초 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 수분이동 모델

본 연구에서는 건물의 온도와 습도 변화를 모사할 수 있는 상용 프로그램인 WUFI 2D(WUFI, 2014)를 사용하였다. 해당 프로그램은 비유동적인 2차원 온도와 수분 이동을 모사하는 프로그램으로 증기 확산과 모세관 수분 전달, 재료의 수분 저장력을 고려한다(Künzel, 1995). 또한, 뽕칠 방수 멤브레인은 불투수층에 가깝고 터널 라이닝에 사용되는 콘크리트의 투수계수도 기반암에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 Darcy 흐름은 여기에 고려되지 않는다. WUFI 2D(WUFI, 2014) 해석에 사용된 지배 방정식의 1차원 형식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (g_w + g_v) \quad (1)$$

여기서, w 는 수분 함유량 (kg/m^3), t 는 시간(s), g_w 는 모세관 압으로 인한 액체 전달 밀도($\text{kg/m}^2\text{s}$), g_v 는 증기 확산 밀도($\text{kg/m}^2\text{s}$)이다. 지배 방정식에 사용된 모세관 압과 증기의 흐름에 관한 계수는 아래 식 (2)와 (3)과 같이 표현된다.

$$g_w = -D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

$$g_v = -\delta_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

여기서, D_ϕ 는 액체 전도 계수(kg/ms), δ_p 는 증기 투수 계수(kg/msPa), ϕ 는 상대습도(%), p 는 증기압(Pa)이다. 수분 이동 해석에서 무게 함수비 대신 상대습도를 쓰는 이유는 해석상 상이한 재료 사이에서도 함수비보다 상대습도가 상대적으로 재료사이에서 연속적으로 분포하기 때문이다. 액체 전도 계수 D_ϕ 와 모세관 전달 계수 D_w (m^2/s)와의 관계는 아래 식 (4)와 같다.

$$D_\phi = D_w \frac{dw}{d\phi} \quad (4)$$

여기서 $dw/d\phi$ (kg/m^3)는 수분 저장 함수(moisture storage function)의 도함수이다(Künzel, 1995). 그런데, 만약 재료의 표면에서 자유수 접촉을 통해 모세관 흡수 현상이 발생하거나 외부의 자유수가 제거되고 남아 있는 물이 재료 내부로 재분배(D_{ww}) 되는 경우, D_w 는 모세관 흡수 계수인 D_{ws} 와 같아지게 될 것이다. 특정 재료의 D_{ws} 와 D_{ww} 를 직접 측정하는 것은 상당히 복잡한 과정을 거쳐야 하고 비용도 비싸기 때문에, WUFI(2014)에서는 D_{ws} 를 다음 식 (5)와 같이 수분 함유량(w)에 따른 간편 함수를 사용하여 계산한다.

$$D_{ws}(w) = 3.8 \times \left(\frac{A_w}{w_f} \right)^2 \times 1000 \frac{w}{w_f}^{-1} \quad (5)$$

여기서, A_w 는 단기 모세관-물 흡수 계수 ($\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$), w 는 수분 함유량(kg/m^3), w_f 는 포화 상태에서의 수분 함유량(kg/m^3)을 나타낸다. w 와 w_f 는 재료의 수분 탈착(desorption) 실험에서 나타난 상대습도와 수분 함유량과의 관계를 통해 획득할 수 있다.

3. 수분이동 해석

3.1 해석 모델

본 연구에서 고려한 뽕칠 방수 멤브레인이 포함된 터널 복합 라이닝 구조의 개념도는 Fig. 2와 같다. 그림에서 좌측 기반암에서부터 1차 숏크리트가 타설되고 이후 뽕칠 방수 멤브레인이 시공되며 마지막으로 2차로 숏크리트가 타설된 모양으로 단면을 구성하였다. 해석에 사용된 뽕칠 방수 멤브레인의 두께(t)는 3 mm로 가정하였으며 1차 숏크리트의 두께는 200 mm, 2차 숏크리트의 두께는 60 mm로 가정하였다. 본 연구에서 가정한 터널 단면은 기존 문헌(Holter, 2015; Holter, 2016; Holter and Geving, 2016)에서 실측한 현장 조건을 고려하여

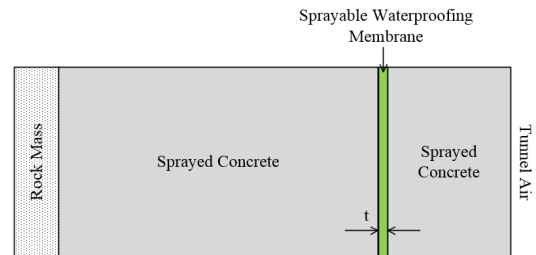


Fig. 2. Assumed tunnel section for numerical analysis with the sprayable waterproofing membrane

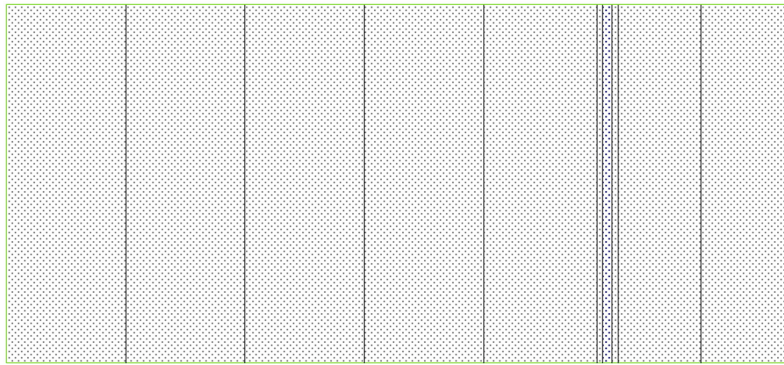


Fig. 3. Numerical material model

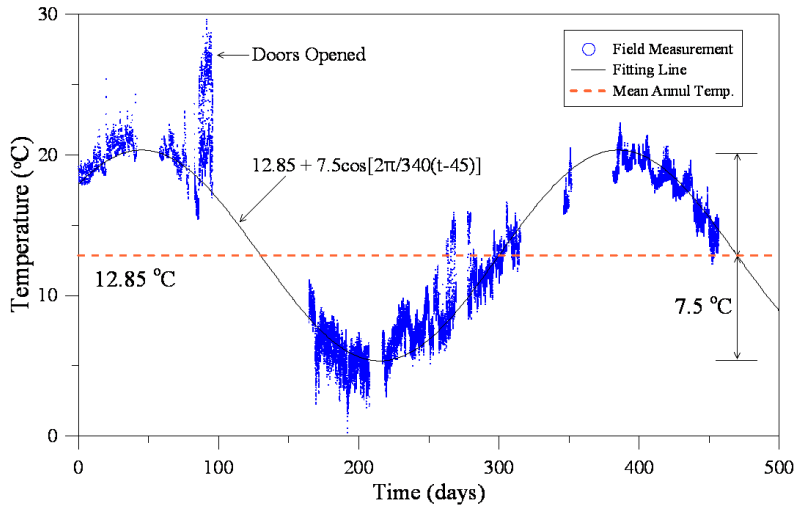


Fig. 4. Annual temperature of the inside tunnel (Lee, 2012)

작성되었다.

가정한 터널 구조를 해석 모델로 작성한 그림은 Fig. 3 과 같다. 해석 모델에서는 기반암을 직접 모델링 하지는 않고 포화된 상태를 가정하여 경계조건으로 사용하였으며 해석의 편의성을 위해 40 mm 단위로 모델을 분할하였다. 뿔칠 방수 멤브레인 주변은 해석 정확도를 위해 양쪽에 2 mm만큼 더 분할하여 격자가 자세히 분배되도록 하였다. 기반암으로부터의 수분 이동을 1차원 흐름으로 유도하기 위하여 해석 모델의 상하부는 무한 경계조건으로 고려하였다. 터널 내부 조건에 해당하는 우측면은 연중 온도와 상대습도를 가정하여 적용하였다. 해석에 사용된 직사각형 격자의 수는 10,816개 이고 해석은 1시간 단위로 총 5년 동안 모사되었다.

3.2 경계조건 및 초기조건

해석에서 시간에 따른 변화를 유도하는 경계조건은 터널 내부의 조건이다. 터널 내부의 온도는 터널 바깥 대기 온도의 변화에 따라 변화하는 것으로 알려져 있으며 터널 벽면의 온도와 터널 내부의 온도에 따라 습도도 달라진다. Lee(2012)는 충남 서천군에 위치한 철도 폐터널에서 1년이상 내부온도를 모니터링 하고 이를 삼각함수 형태로 Fig. 4와 같이 제시한 바 있다. Lee(2012)는 터널 내부의 연중 평균온도가 주변지역 대기의 평균 온도와 유사한 12.85 °C로 나타났으며 연중 편차는 7.5 °C 인 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 문헌에서 제시한 터널 내부의 평균온도는 동일하게 적용하였으며 연중 편차는 문헌 값의 절반인 3.75 °C를 경계조건으로 적용하여 내부온도 편차가 완화된 터널 조건으로 가정하였

Table 1. Material parameters used in the hygrothermal simulation (SINTEF, 2011; Gomes, 2005; Holter et al., 2013; Holter, 2015; Holter, 2016; Holter and Geiving, 2016)

Material	Parameters	Unit	Value
Sprayed concrete	Density	kg/m ³	2297
	Capillary absorption number	kg/m ² √s	0.0054
	Vapor permeability	kg/msPa	0.74×10 ⁻¹²
	Moisture content at saturation	kg/m ³	228
	Moisture content at RH 60%	kg/m ³	123
	Moisture content at RH 95%	kg/m ³	194
	Thermal conductivity	W/mK	3.0
Sprayable waterproofing membrane	Unidirectional absorption number	kg/m ² √s	0.0036
	Vapor permeability	kg/msPa	0.9×10 ⁻¹²
	Moisture content at RH 60%	kg/m ³	135
	Moisture content at RH 95%	kg/m ³	145
	Thermal conductivity	W/mK	0.45

다. 우리나라 장마철을 고려하여 터널 내부의 상대습도는 8월이 가장 높은 것으로 적용하였다. 상대습도는 연중온도와 유사한 경향을 갖도록 하였으며 평균 상대습도는 75%이고 연중 편차는 25%로 적용하였다.

Holter and Geving(2016)은 터널 라이닝에 대한 현장 실험을 통해 현장의 DCS(degree of capillary saturation)가 100%에 가깝다고 보고한 바 있다. 따라서, 본 연구에서는 기반암의 상대습도를 100%로 가정하고 경계조건으로 적용하였으며 물과 직접적인 접촉이 가능한 것으로 가정하였다. 해석에서 물과 직접적인 접촉을 가정할 경우, 기반암 경계조건에의 모세관 흡수 계수(D_{ws})는 D_{ww} 로 대체된다. 일반적으로 D_{ws} 는 D_{ww} 보다 작은 것으로 알려져 있는데(Holter, 2016), 본 연구에 가정한 기반암의 경계조건으로 인해 해석에서 D_{ws} 는 크게 고려되지 않는다. 따라서, 상대습도 80% 이하에서 D_{ws} 는 0으로 가정하였다.

3.3 재료의 물성

해석에 사용된 재료의 물성은 Table 1과 같다. 재료의 물성은 현장 계측과 실내실험을 수행한 기존 문헌(SINTEF, 2011; Gomes, 2005; Holter et al., 2013; Holter, 2015; Holter, 2016; Holter and Geiving, 2016)을 참고하여 가정하였다. 해석에 입력되는 재료별 증기 확산 저항 계수(vapor diffusion resistance factor)는 재료별로 가정한 증기 투수계를 통해 산정하였으며 Schirmer의 간판식(WTA 6-2-0, 2004; Slanina and Šilarová, 2009)을 사용하였다. 슛크리트와 뿔칠 방수형 멤브레인의 간극률은 정의에 따라 포화된 상태의 수분 함유량을

사용하여 적용하였다. 슛크리트의 열전도도는 문헌에서 제시하는 값으로 3.0 W/mK를 적용하였으며 뿔칠 방수 멤브레인의 경우 비정상 열선 측정법(Lee et al., 2010)을 사용하여 측정된 재료의 평균값으로 적용하였다.

초기 조건은 상대습도 95%에 해당하는 수분 함유량으로 슛크리트와 뿔칠 방수 멤브레인에서 각각 194, 145 kg/m³을 가정하였으며 초기온도는 9.5 °C로 설정하였다. 일반적으로 슛크리트가 물에 노출되어 외부조건 없이 물을 흡수할 때 재료 내부의 상대습도는 90-95% 정도에 달하는 것으로 알려져 있다(SINTEF, 2011).

4. 수분이동 해석 결과

수분 이동 해석 결과는 특정 지점과 시간에서 상대습도(%)로 제시되는 값과 절대 수분 함유량(kg/m³)으로 나타난다. 또한 해석 경계면에서 수분 유속(moisture flux, kg/m²s)을 산정할 수 있다. 해석 결과는 매 시간 기록되도록 하였으며 조건에서 적용한 5년간 결과가 기록되었다. 따라서 특정 시간과 위치에서 경계면에서 발생한 수분 유속과 수분 조건을 계산 시점부터 검토할 수 있다. 본 연구에서 고려한 해석 결과는 슛크리트 내부의 상대습도와 절대 수분 함유량 변화, 기반암 경계에서 발생하는 터널 내부로의 수분 유속을 검토하였다.

Fig. 5는 기반암에서부터 터널 내부까지 방향으로 나타난 시간당 상대습도 변화를 나타낸다. 1년간 2차 슛크리트 부분을 통해 터널 내부로 수분이 이동한 것을 확인할 수 있으며 이때 방수 멤브레인의 상대습도는 초기조건으로 사용한 95% 정도로 큰 변화가 없는 것으로

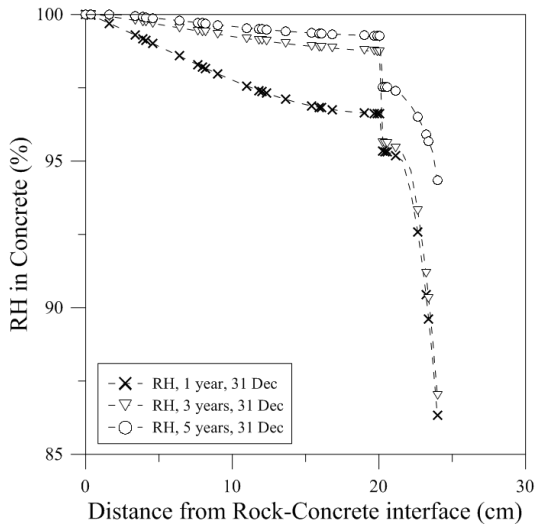


Fig. 5. Simulation result of relative humidity (RH) in the sprayed concrete

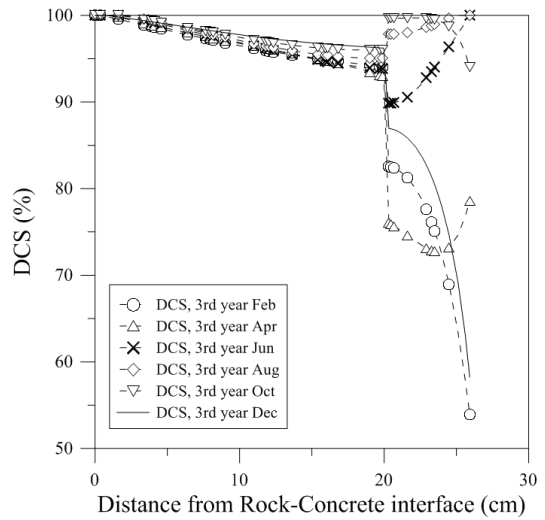


Fig. 7. Moisture content in the sprayed concrete given as degree of capillary saturation at 3rd year

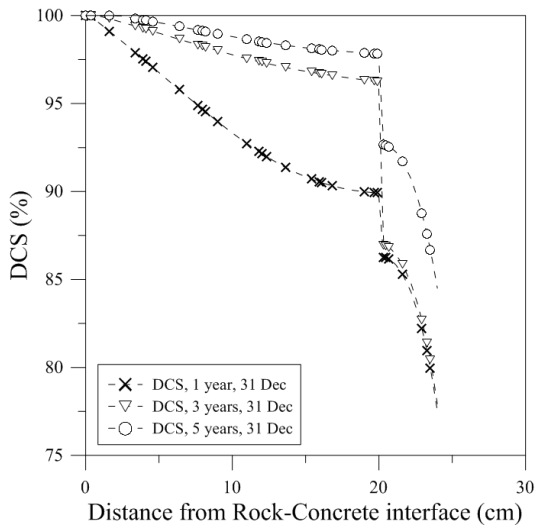


Fig. 6. Moisture content in the sprayed concrete given as degree of capillary saturation

나타났다. 하지만 3년이 흐른 뒤에는 기반암으로 이동되는 수분에 의해 기반암 방향 멤브레인 주변의 상대습도가 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 2차 숏크리트 표면을 통해 빠져나가는 수분의 이동보다 기반암으로부터 이동되는 수분의 양이 많기 때문으로, 이러한 점이 방수 멤브레인의 상대습도가 증가하는 원인이 된다. 해석 시간 5년 뒤에는 방수 멤브레인 주변 숏크리트의 상대습도가 초기상태보다 증가한 것을 볼 수 있으며 방수

멤브레인을 통한 수분의 이동으로 2차 숏크리트의 상대습도도 증가한 것을 볼 수 있다.

Fig. 6는 해석된 결과를 DCS(degree of capillary saturation)로 표현하여 나타낸 것이다. DCS는 모세관 포화도를 나타내는 것으로서 시료에 포함된 물의 무게와 모세관 포화 상태에서의 물의 무게 간 비율로 정의된다. 그림에서도 알 수 있듯이 시간이 지날수록 기반암 방향의 숏크리트의 DCS가 증가하는 것을 볼 수 있으며 터널 내부 방향의 숏크리트도 처음 3년간은 변화가 크지 않다가 기반암 방향의 숏크리트 층의 DCS가 증가함에 따라 터널 내부 방향의 숏크리트 층도 시간이 지남에 따라 DCS가 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 뿔칠 방수 멤브레인이 투수성이 거의 없는 재료이지만 모세관 수분 이동을 통해 수분이 이동할 수 있음을 나타내는 것으로 장기간에 걸친 성능 검토가 필요함을 나타내는 결과로 볼 수 있다. Fig. 7은 해석시간 3년째에 연중 DCS의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 나타나듯이 터널 내부의 습도 변화로 인해 멤브레인과 터널 벽면 사이의 변화가 계절에 따라 크게 나타나지만 기반암 방향의 숏크리트의 DCS의 변화가 상대적으로 크지 않고 시간이 지남에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 숏크리트와 기반암 경계의 시간에 따른 수분 유속을 나타낸다. 주어진 조건에서 기반암으로부터 터널 내부 방향의 수분 유속은 초기 $6.8 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가하다가 시간이 지남에 따라 점차 감소하지만 5년 뒤에도 $1.6 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 나타나서 1일 단위 면적당 1.4

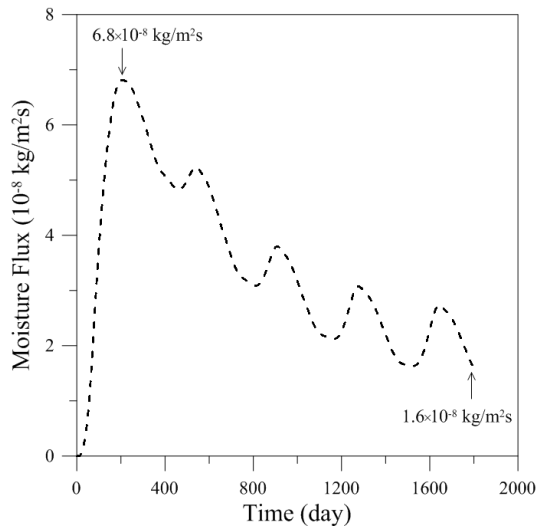


Fig. 8. Moisture flux at the rock-concrete interface

cm^3 이동한 것으로 나타났다. 이는 문헌(Holter and Geving, 2016)에서 보고한 방수 멤브레인을 통한 수분 유속인 3.7 또는 $2.8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 보다는 작은 양이지만 지속적으로 터널 내부 방향으로 수분이 이동한다는 것을 의미한다. 그림에서도 알 수 있듯이 수분 유속은 시간이 지날수록 연중 최댓값과 최솟값이 점점 수렴해 가는 모양으로 진행되는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 뿔칠 방수 멤브레인이 시공된 터널 라이닝 구조의 수분이동 해석을 수행하였으며 다음과 같은 주요 결론들을 도출하였다.

1. 뿔칠 방수 멤브레인이 시공된 조건을 가정하여 터널 라이닝 구조를 구성하고 수분 이동 해석을 위한 재료의 물성을 정의할 수 있었다. 터널 라이닝 구조의 수분 이동을 발생 시키는 터널 내부 공기 조건은 기존 문헌에서 보고한 우리나라 폐터널에서 측정된 연중 측정 자료를 활용하여 적용하였다.
2. 시간이 지날수록 기반암 방향의 슛크리트의 DCS가 증가하는 것으로 나타났으며 터널 내부 방향의 슛크리트도 처음 3년간은 변화가 크지 않다가 기반암 방향의 슛크리트층의 DCS가 증가함에 따라 터널 내부 방향의 슛크리트 층도 DCS가 증가한 것을 알 수 있었다.

3. 주어진 조건에서 기반암으로부터 터널 내부 방향의 수분 유속은 초기 $6.8 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 으로 증가하다가 시간이 지남에 따라 점차 감소하지만 5년 뒤에도 $1.6 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 나타나서 1일 단위 면적당 1.4 cm^3 이동할 수 있는 것으로 나타났다.
4. 주어진 조건에서 수분 이동 해석을 수행한 결과 시간이 지남에 따라 포화된 기반암으로부터 수분 이동에 의해 라이닝 구조의 상대습도가 증가한 것을 알 수 있었으며 뿔칠 방수 멤브레인이 시공되어 있다고 하더라도 수분의 이동으로 인해 물이 유출될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업인 “지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발(과제번호: 15SCIP-B10 8153-01) - 3세부과제: 지반 굴착 시 차수성능향상을 위한 보강기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Gomes, A.R.A., 2005, Waterproofing and drainage systems for transport tunnels—a review of current practices. *Felsbau* 3:46-49
2. Holter K.G., 2016, Performance of EVA based sprayed membranes in hard rock, *Rock Mech Rock Eng*, Vol. 49(4), pp. 1329-1358.
3. Holter, K.G. and S. Geving, 2016, Moisture Transport Through Sprayed Concrete Tunnel Lining, *Rock Mech Rock Eng*, Vol.49(1), pp. 243-272.
4. Holter, K.G., 2015, Properties of waterproof sprayed concrete tunnel lining, Doctoral theses, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
5. Holter, K.G., H. Buvik, B. Nermoen, B., Nilsen, 2013, Future trends for tunnel lining design for modern rail and road tunnels in hard rock and cold climate. In: Anagnostou G, Ehrbar H (eds) Proc. ITAAITES World Tunnel Congress Geneva 2013—underground the way to the future
6. International Tunnelling Association (ITA/AITES), 2013, ITAtech Report No 2. Design Guidance for Spray Applied Waterproofing Membranes. International Tunnelling Association
7. Künzel, H.M., 1995, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
8. Lee, C., 2012, Performance of Ground Heat Exchangers for Civil Infrastructures, Ph.D. Thesis, Korea university, Seoul, South Korea.

9. Lee, C., K. Lee, H. Choi, H-P. Choi, 2010, Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea, Science in China Series E: Technological Sciences, Vol. 53(1), pp. 123-128.
10. Lemke, S., 2014, A blessing or Pandora's box—spray applied membranes: an objective review. In: Proceedings of the seventh international symposium on sprayed concrete, Sandefjord. Tekna/Norwegian Concrete Association, Oslo.
11. Maidl, B., 2013, Handbook of tunnel engineering I, structures and methods. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
12. SINTEF, 2011, Testing of sprayed concrete. Determination of water penetration, air pores and frost resistance. Report no. 3D0059.21, SINTEF, Trondheim
13. Slanina P. and Š. Šílarová, 2009, Moisture transport through perforated vapour retarders, Building and Environment, Vol. 44(8), pp. 1617-1626.
14. WTA 6-2-0, 2004, Simulation of heat and moisture transfer, WTA Publications, Munchen, Germany, p. 16.
15. WUFI, 2014, http://www.wufi.de/index_e.html

이 철 호



2005년 고려대학교 공과대학 사회환경 시스템공학과 공학사
 2008년 고려대학교 대학원 건축사회환경 공공학부 공학석사
 2012년 고려대학교 대학원 건축사회환경 공공학부 공학박사

Tel: 031-910-0437
 E-mail: chlee@kict.re.kr
 현재 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

강 태 호



1998년 중앙대학교 건설대학 토목공학과 공학사
 2000년 중앙대학교 대학원 지구환경시스템공학과 공학석사
 2006년 중화대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-910-0455
 E-mail: thkang@kict.re.kr
 현재 한국건설기술연구원 지반연구소 신진연구원

최 순 욱



1997년 건국대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 2004년 연세대학교 공학대학원 공학석사
 2014년 연세대학교 대학원 토목환경공학과 공학박사

Tel: 031-910-0243
 E-mail: soonugi@kict.re.kr
 현재 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원

장 수 호



1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2002년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 031-910-0661
 E-mail: sooho@kict.re.kr
 현재 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구위원
